Hintergrund

Airbus A321 LR & XLR – Flugmechanik, Verbräuche, Betriebskosten, Umwelt

Kraftstoffverbrauch, Betriebskosten und Umweltauswirkungen - neue Flugzeuge müssen in diesen Kategorien Spitzenwerte bringen. Doch können es die neuen kleinen Langstreckenflugzeuge von Airbus mit den modernen Großraumflugzeugen aufnehmen? Professor Dieter Scholz blickt auf den Airbus A321 XLR.

Von Prof. Dr. Dieter Scholz

2. August 2022



© Airbus

Höher, schneller und vor allem weiter! Das war die Motivation aus den Anfängen der Fliegerei. Erst ging es um die Überquerung des Ärmelkanals, dann um die Überquerung des Atlantiks. Reichweiten begeistern heute wieder. Beim Airbus A321 Neo steht LR für "Long Range". Doch es soll noch weiter gehen. Der neue Airbus A321 XLR kann von New York nach Rom fliegen oder von London nach Miami, so erklärt es Airbus. Kraftstoffverbrauch, Betriebskosten und Umweltauswirkungen – dieser Dreiklang soll in diesem Beitrag für die neuen Langstreckenvarianten des Airbus A321 Neo betrachtet werden.

Eigentlich hatte die Passagierluftfahrt hinsichtlich der Reichweite schon alles ermöglicht. Mit Langstreckenflugzeugen sind Reichweiten halb um die Welt möglich. Das reicht aus, um an jeden Ort zu gelangen. Wichtig wurde nach "höher, schneller, weiter" die Wirtschaftlichkeit der Flugzeuge.

Bei Großraumflugzeugen, die bislang meist auf der Langstrecke unterwegs sind, wurde aber beobachtet, dass ein großes Flugzeug gelegentlich nicht voll wird. Das war ein Grund für die wirtschaftlichen Probleme des A380.

Mit den A321-Neo-Varianten A321 LR und A321 XLR geht Airbus jetzt den entgegengesetzten Weg und bietet ein für lange Strecken eher kleines Flugzeug an. Neue Strecken können so von Airlines getestet werden. Direktverbindungen zwischen Städtepaaren, die nur kleine Passagierzahlen generieren, werden wirtschaftlich möglich.

Für die Langstrecke muss aber an Bord mehr Komfort angeboten werden als auf der Kurzstrecke, weswegen man vor allem bei kleineren Langstreckenflugzeugen über die Sitzplatzverbräuche nachdenken muss. Bleibt die Umwelt unbeachtet, wenn es wieder darum geht, neue Streckenrekorde aufzustellen, nur dieses Mal mit kleineren Flugzeugen?

Über den Autor



Prof. Dr. Dieter Scholz ist Professor für Flugzeugentwurf, Flugzeugsysteme und Flugmechanik an der HAW Hamburg (Hamburg University of Applied Sciences). Er ist dort Leiter der Aircraft Design und Systems Group (AERO) und engagiert sich zum Thema "Luftfahrt und Gesellschaft".

Kontakt: hhttp://www.ProfScholz.de

Die Breguet'sche Reichweitenformel

Fangen wir mal ganz am Anfang an. Zur Abwechslung mal eine Formel. Die Reichweite von Flugzeugen kann man natürlich berechnen. Von den vielen Formeln ist die Breguet'sche Reichweitenformel am Berühmtesten. Genau genommen gilt die Formel für Jets im Reisesteigflug (cruise climb) bei konstanter Fluggeschwindigkeit.

$$R = \frac{E\,V}{c\,g} \ln\left(\frac{m_{TO}}{m_L}\right)$$

Die Formel wurde übrigens nicht von Louis Charles Breguet erdacht, sondern ehrenhalber nach ihm benannt. Darin ist E die Effizienz der Aerodynamik, ausgedrückt durch die Gleitzahl (das Verhältnis von Auftrieb und Widerstand). V ist die Fluggeschwindigkeit, c steht hier für den spezifischen Verbrauch (consumption), g ist die Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2). Die Massen sind mit m bezeichnet. Die Masse des Flugzeugs verringert sich während des Fluges von der Startmasse (take-off) zur Landemasse (landing) durch Kraftstoffverbrauch.

Die Gleichung enthält nur ein Masseverhältnis, keine absolute Masse. Das bedeutet, dass man gleich gut sowohl mit großen als auch mit kleinen Flugzeugen hohe Reichweiten erreichen kann. Die Statistik zeigt, dass es eher die großen Flugzeuge sind, die große Reichweiten haben. Das liegt aber nur daran, dass im Hub-and-Spoke-System aus Gründen der Wirtschaftlichkeiten zwischen den Hubs große Flugzeuge eingesetzt werden. Bei den Point-to-Point-Verbindungen können auch kleine Flugzeuge zum Einsatz kommen. Das geht nach der Flugphysik genauso gut.

Das Massenverhältnis steht im Logarithmus (ln). Das muss man nicht verstehen. Dafür gibt es den Taschenrechner. Wenn ein Flugzeug bei einem Flug die Hälfte seiner Masse als Kraftstoff verliert, dann ist das Massenverhältnis 2 und der Taschenrechner sagt, dass der natürliche Logarithmus davon 0,69 ist.

Natürlich wird die Reichweite größer, wenn man mehr Kraftstoff mitnimmt. Dafür werden bei Airbus die Zusatztanks gebaut. Es geht aber nicht um die absolute Kraftstoffmasse, sondern um den Kraftstoffanteil, also um die Kraftstoffmasse (Index *F* wie fuel) bezogen auf die Startmasse (Index *TO*). Um es einfach zu machen schreibe ich die Formel komplizierter. So dass wir den Kraftstoffanteil deutlich sehen.

$$R = \frac{E\,V}{c\,g}\,\frac{m_F}{m_{TO}}\,\frac{\ln\left(1/\left(1 - m_F/m_{TO}\right)\right)}{m_F/m_{TO}}$$

Die Reichweite steigt also mit dem Kraftstoffanteil. Dann gibt es noch einen "Zusatzterm", einen Bruch, der oben im Zähler den Logarithmus (ln) enthält. Durch diesen Zusatzterm erhält man so etwas wie einen Reichweitenbonus. Den Bonus gibt es für einen hohen Kraftstoffanteil. Wenn ein Flugzeug zum Beispiel auf einem Langstreckenflug 50 Prozent an Gewicht verliert durch Kraftstoffverbrauch, dann fliegt es am Ende des Fluges leicht und mit weniger Widerstand. Im Beispiel ist der Bonus dann der Faktor 1,38. Die relative Kraftstoffmasse erhöht sich dadurch in ihrer Wirkung von 50 Prozent = 0,5 auf den Wert 0,5 mal 1,38 also auf 0,69. Das ist die gleiche Zahl, die wir oben schon mit dem Taschenrechner erhalten hatten.

Nur für diejenigen, die sich mit dem "Bonusfaktor" weiter beschäftigen wollen: Bei einem Kraftstoffanteil von 0 Prozent ist der Bonusfaktor eins. Durch den Bonusfaktor wird dann nichts erhöht, denn es ist kein Kraftstoff vorgesehen, es wird kein Kraftstoff verbraucht und das Flugzeug wird nicht leichter. Ein sehr hoher Kraftstoffanteil nahe 100 Prozent kommt in der Praxis nicht vor. Also erübrigen sich Fragen dazu.

Die Breguet'sche Reichweitenformel für Jets enthält im Zähler die Fluggeschwindigkeit. „Super“, könnte man denken, „wenn wir nur so schnell fliegen wie mit der Concorde, dann kommen wir richtig weit. Wenn wir schnell fliegen, dann sind wir schon am Ziel bevor der Tank leergelaufen ist!“

Nein, so ist es natürlich nicht. Der Verbrauch pro Zeit steigt mit der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit ist bei Jets nur in der Formel enthalten, weil sich bei ihnen der spezifische Kraftstoffverbrauch auf den Schub bezieht und nicht wie bei Propellerflugzeugen auf die Leistung. Die Reichweitengleichung für Propellerflugzeuge enthält die Geschwindigkeit daher nicht.

Für Jets und für Propellerflugzeuge kann man die Größen V (soweit vorhanden), c und g zusammenfassen und erhält je nach Flugzeug einen Wert von etwa 1500 Kilometer. Soweit fliegt ein Flugzeug wenn die Gleitzahl den Wert 1 hätte, wenn das Flugzeug nur aus Kraftstoff bestünde und wenn wir den Reichweitenbonus unberücksichtigt lassen. Bei einer Gleitzahl, E von 20 kämen wir 30.000 Kilometer weit (diese Zahl wird Breguetfaktor genannt), mit 50 Prozent relativer Kraftstoffmasse nur 15.000 Kilometer, mit „Bonus“ aber 20.700 Kilometer weit – also halb um die Erde.

Das Nutzlast-Reichweitendiagramm

An dieser Stelle müssen wir auch über die Nutzlast nachdenken. Ein Passagierflugzeug besteht im besten Fall nur zu 45 Prozent aus Betriebsleermasse. Bei 50 Prozent Kraftstoffanteil blieben also

nur noch fünf Prozent für die Nutzlast. Soll mit einem Flugzeug Geld verdient werden, dann darf man den Kraftstoff nicht fast ausschließlich dazu nutzen, um Metall und Kunststoff zu bewegen.

Der Kraftstoffanteil muss also gesenkt werden, um den Anteil der Nutzlast zu erhöhen. Das geht am einfachsten durch geringere Reichweiten. Der Kraftstoffanteil kann auch durch bessere Technik verringert werden. Das ist bekanntlich nicht einfach.

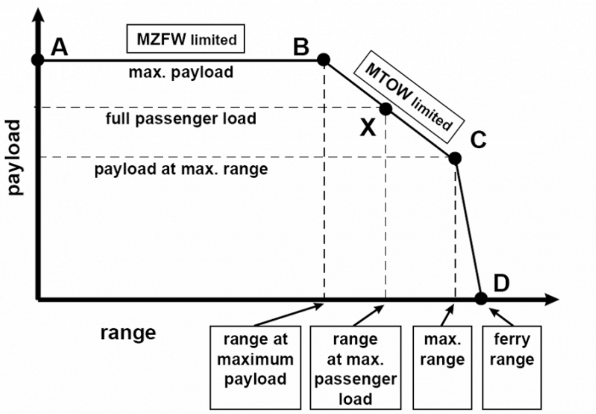
Die Vorstellung, dass man nur immer größere Tanks einbauen müsste und dann würde man immer weiter kommen, funktioniert so nicht, weil das Flugzeug dann auch schwerer wird. Wir sind hier gedanklich von unserer Alltagserfahrung mit dem Auto geleitet. Das Auto ist schwer im Vergleich zum Kraftstoff im Tank. Ob wir mit dem Tank voll oder fast leer fahren macht für uns keinen messbaren Unterschied. Wenn wir noch einige Kanister Kraftstoff im Kofferraum mitnehmen, dann fahren wir auch entsprechend (proportional) weiter.

Traumhaft für Reichweitenrekorde wäre ein Tanklastwagen, der den Kraftstoff aus dem großen Tank nimmt. Der Tanklastwagen würde dann natürlich keine nennenswerte Nutzlast mehr befördern, aber weit kommen. Wenn ein LKW ein Kilogramm Diesel pro Tonne Gesamtmasse verbraucht auf 100 Kilometer, dann käme der LKW auf einen Breguetfaktor von 100.000 km. Bei 60 Prozent Kraftstoffanteil des Tanklastwagens wäre das eine Reichweite von 60.000 km und mit "Bonus" (1,53) 91.000 km .

Jetzt verstehen wir auch, warum nur hochpreisige Güter mit dem Flugzeug transportiert werden. Das Flugzeug verbraucht mehr als der LKW pro Kilogramm Nutzlast.

Zurück zum Flugzeug. Es besteht die Möglichkeit, wahlweise mehr Kraftstoff oder mehr Nutzlast mitzunehmen. Der Zusammenhang wird im Nutzlast-Reichweitendiagramm dargestellt.

Das Nutzlast-Reichweitendiagramm zeigt die Möglichkeiten für den Flugbetrieb auf. Deutlich wird auch, welche Möglichkeiten zur Modifikation eines Flugzeugs durch den Hersteller bestehen.



Das Nutzlast-Reichweitendiagramm (Payload-Range-Diagram) erklärt (Scholz 2015). © Scholz

Das Diagramm gilt für ein Flugzeugmuster, mit einem Triebwerkstyp, eine Reiseflugmachzahl und definierte Kraftstoffreserven. Bei größeren Passagierflugzeugen wird davon ausgegangen, dass der Ausweichflugplatz 200 NM entfernt ist.

Im Diagramm wird die Reichweite (range) horizontal aufgetragen. Vertikal wird die Nutzlast (payload) aufgetragen. Auf sehr kurzen Flugstrecken wird insgesamt wenig Kraftstoff verbraucht und die Nutzlast könnte theoretisch extrem hoch gewählt werden. Diese unsinnige Möglichkeit wird jedoch abgeschnitten durch das Maximum Zero Fuel Weight (MZFW). Im Diagramm ist das zwischen den Punkten A und B sichtbar. Durch das MZFW werden die

Strukturlasten begrenzt, was dem Leichtbau zugutekommt.

Zwischen den Punkten B und C besteht die Möglichkeit, Nutzlast gegen Kraftstoff (und damit Reichweite) auszutauschen. Dabei darf das Maximum Takeoff Weight (MTOW) nicht überschritten werden. Am Punkt C ist der Tank voll. Weniger Nutzlast kann nicht mehr gegen mehr Kraftstoff eingetauscht werden.

Die Linie B-C könnte nach rechts oben verschoben werden, wenn das MTOW des Flugzeugs durch den Hersteller erhöht wird. Dadurch steigen aber die Lasten, was Verstärkungen an der Struktur erfordern würde. Die Verstärkungen erhöhen die Betriebsleermasse, was die Nutzlast wieder etwas reduziert. Airbus vergrößert bei der A321 LR/XLR durch Zusatztanks die Kraftstoffmasse. Dadurch wird die Gerade B-C nach rechts unten über den Punkt C hinaus verlängert.

Zwischen den Punkten C und D wird die Reichweite noch etwas gesteigert, weil mit weniger Nutzlast und somit leichter geflogen wird. Am Punkt D wird ohne Nutzlast geflogen. Hier kann kein Geld verdient werden, aber ein Flugzeug könnte so einen langen Überführungsflug (ferry flight) machen.

Die maximale Nutzlast ist höher als es für die Beförderung der Passagiere mit Gepäck bei maximaler Bestuhlung erforderlich ist. Das ermöglicht den Transport von Zusatzfracht. Der wirtschaftlichste Punkt für den Flugbetrieb ist der Punkt B. Wenn eine Airline an Zusatzfracht nicht interessiert ist, dann ist Punkt X die maximale wirtschaftliche Reichweite.

Übrigens kann der Kraftstoffverbrauch eines Flugzeugs aus dem Nutzlast-Reichweitendiagramm an der Geraden B-C abgelesen werden. Es wird deutlich, wieviel Kilogramm Nutzlastabnahme (oder Kraftstofferhöhung) zu wie vielen Kilometern zusätzlicher Reichweite führt. Das ergibt den Verbrauch in Kilogramm pro Kilometer.

Ein Nutzlast-Reichweitendiagramm ist für die meisten Passagierflugzeuge veröffentlicht in den Dokumenten, die Flugzeughersteller den Flughäfen zur Verfügung stellen. Bei Airbus sind es die Dokumente mit dem Namen "AIRCRAFT CHARACTERISTICS – AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING". Das Dokument für den Airbus A321 ist archiviert als https://perma.cc/3HL8-86BT.

AIRCRAFT CHARACTERISTICS – AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING, Airbus A321

ab PDF-Seite 27: Massen
ab PDF-Seite 30: Tankgrößen
ab PDF-Seite 146:
Nutzlast-Reichweitendiagramm

Bild am Ende des Artikels:
Das Nutzlast-Reichweitendiagramm für die verschiedenen Versionen der A321 Neo

Am Beispiel des Nutzlast-Reichweitendiagramms von Airbus können weitere Erkenntnisse abgelesen werden. Das Nutzlast-Reichweitendiagramm wird in der Regel einfach so gezeichnet, dass es aus Geraden zusammengesetzt wird. An der grünen Linie (93,5 t) wird deutlich, dass die Linien bei genauer Rechnung und Darstellung eine schwache Krümmung aufweisen.

Im Vergleich der lila Linie (89 t) und der grünen Linie (93,5 t) wird deutlich, dass die Linie B-C nach oben rechts verschoben

wird mit steigendem MTOW. Das geht so weit, bis die Linie A-B und die Linie C-D zusammentreffen. Die Punkte B und C sind dann identisch.

Wenn bei gleicher Abflugmasse Zusatztanks eingebaut werden, dann verringert deren Leermasse die Nutzlast. Das wird deutlich im Diagramm bei der maximalen Nutzlast (horizontale Linie A-B) und dort, wo es zu einer Begrenzung durch MTOW kommt (Linie B-C).

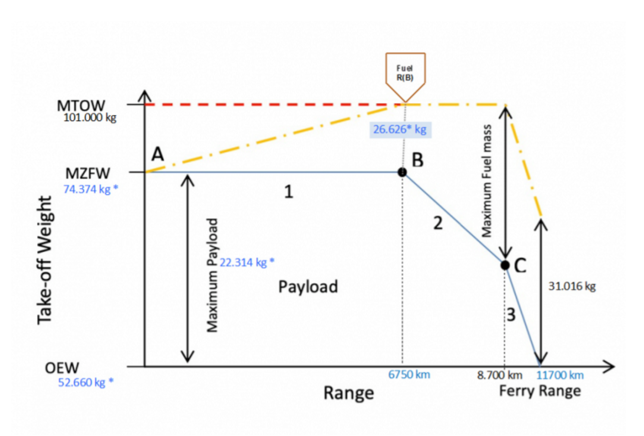
Wenn der Punkt C zu höheren Reichweiten (horizontal) verschoben werden soll, dann ist eine Erhöhung des MTOW und zusätzlich eine Vergrößerung des Tanks notwendig.

Flugzeuge werden so entworfen, dass sie den Kraftstoff zuerst in den Flügeln aufnehmen. Wenn mehr Volumen erforderlich ist, dann kommt der Flügelmittelkasten hinzu, wie es standardmäßig bereits bei allen Flugzeugen der A320-Familie der Fall ist. Weiterer Kraftstoff kann in den Leitwerken untergebracht werden, was auch die Anpassung des Flugzeugschwerpunktes während des Fluges erlaubt.

Die A321 nutzt die Leitwerke aber nicht. Es werden Zusatztanks im Frachtraum genutzt. Die LR nutzt bis zu drei Additional Center Tanks (ACT). Die XLR nutzt einen großen Rear Center Tank (RCT) der hinter dem Fahrwerkschacht positioniert ist. Optional gibt es zusätzlich einen kleineren Zusatztank vor den Flügeln.

Das erweiterte Nutzlast-Reichweitendiagramm (siehe Bild) zeigt zwischen der Linie für die Nutzlast (blau)

die Kraftstoffmasse bis zur gelben Linie. Die maximale Abflugmasse (MTOW) ist die obere Grenze der Massen.



Das erweiterte Nutzlast-Reichweitendiagramm der A321 XLR. Die mit * gekennzeichneten Werte wurden aus diversen Quellen berechnet oder geschätzt, weil es dazu keine Veröffentlichungen gibt (Fonseca 2021). © Fonseca

Der Kraftstoffverbrauch

Selbst dann, wenn kein Nutzlast-Reichweitendiagramm gegeben ist, kann aus wenigen öffentlichen Daten mit guter Näherung der Kraftstoffverbrauch errechnet werden. Es werden vier Zahlen benötigt: die maximale Abflugmassen (MTOW), die Masse des voll beladenen Flugzeugs ohne Kraftstoff (MZFW), die maximale Reichweite (R) bei voller Beladung (also bei MZFW) und die Anzahl der Sitzplätze (SP). Damit ist dann

(MTOW – MZFW) / (R · SP) · 100 = Verbrauch

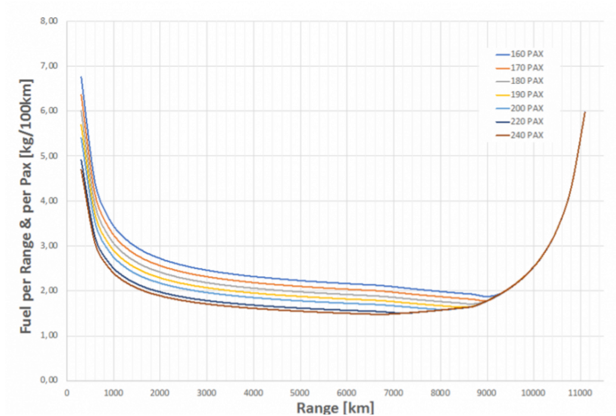
Beispiel Airbus A321 XLR:

(101.000 kg – 74.374 kg) / (6750 km · 180) · 100 = 2,2 kg pro 100 Kilometer und Sitz. Bei einer Dichte von Kerosin von 0,8 kg/l sind das 2,75 Liter pro 100 Kilometer und Sitz.

Der so einfach errechnete Verbrauch fällt etwas zu hoch aus (vergleiche mit dem Diagramm unten), weil die Kraftstoffreserven als verbraucht angenommen werden. Der Vergleich zwischen zwei Flugzeugen ist auf jeden Fall gut möglich.

Genauer geht es, wenn die Kraftstoffreserven korrekt berücksichtigt werden. Hinzu kommen die anfänglich hohen Verbräuche durch Start und Steigflug. Die Energie, die das Flugzeug durch seine Höhe gespeichert hat kann nicht vollständig im Sinkflug genutzt werden, etwa dann, wenn Geschwindigkeitsbremsen (Spoiler) gefahren werden.

Die Rechnung wird für alle Reichweiten durchführt. Es wird beachtet, dass bei großen Reichweiten wegen der begrenzten Nutzlast nicht alle Sitze belegt werden können. Mit diesen Überlegungen ergeben sich die Kraftstoffkurven eines Passagierflugzeugs:



Kraftstoffverbrauch A321 XLR (Fonseca 2021) berechnet aus dem Nutzlast-Reichweitendiagramm und dem Werkzeug unter https://doi.org/10.7910/DVN/2HMEHB, Excel-Datei vom 01.07.2021 (Scholz 2021). © Fonseca

Es fällt auf, dass der Kraftstoffverbrauch stark von der Flugstrecke abhängt. Über einen weiten Einsatzbereich (bei mittlerer Flugstrecke) ist der Kraftstoffverbrauch vergleichsweise konstant. Der Kraftstoffverbrauch pro Sitzplatz steigt stark an, wenn sehr kurze oder für das Flugzeug sehr lange Strecken geflogen werden. Auf kurzen Strecken kann der Verbrauch hoch sein. Im Beispiel ist der Verbrauch bei 500 Kilometer doppelt so hoch wie der minimale Verbrauch des Flugzeugs.

Der Verbrauch sinkt mit der Anzahl der Personen an Bord. Ab einer Reichweite der Nutzlast maximaler Passagierzahl (Punkt X) steigt der Verbrauch pro Sitz an, weil für diese Flüge nicht mehr alle Plätze besetzt werden können. Im Bild gehen die Linien unterschiedlicher Passagierzahlen an verschiedenen Stellen in die braune Linie über, die zunächst für 240 Passagiere steht bei großen Reichweiten aber eine entsprechend kleinere Passagierzahl meint.

Ein vollbesetzter PKW mag pro Person auf geringere Verbräuche kommen. Erstaunlich ist aber doch, dass ein Passagierflugzeug solche geringen Verbräuche pro 100 Kilometer bei so hohen Geschwindigkeiten erreicht. Die hohen Geschwindigkeiten ermöglichen andererseits auch, lange Strecken in begrenzt verfügbarer Zeit zurückzulegen. Das führt dann zu hohen absoluten Verbräuchen und großen ökologischen Fußabdrücken.

Die Betriebskosten

Direct Operating Costs (DOC) wurden berechnet für Airbus A321 LR, A321 XLR und A330-900 Neo. Durch den A330-900 in der Rechnung kann mit einem größeren Flugzeug verglichen werden. Drei DOC-Missionen werden verglichen mit Flugstrecken von 5600 Kilometer, 6500 Kilometer und 7400 Kilometer. Der Rechnung liegt die TU Berlin Methode zugrunde. Kostenelemente der Methode sind Kapitalkosten (Abschreibung), Gebühren (Handling, Landegebühren, Flugsicherungsgebühren), Kosten der Crew, Wartungskosten und Kraftstoffkosten.

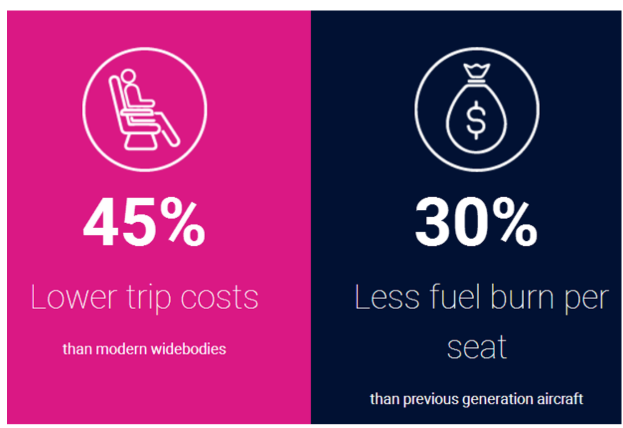
Zunächst noch einmal zum Kraftstoffverbrauch. Gezeigt ist der Verbrauch der drei genannten Flugzeuge im Vergleich. Es handelt sich um drei moderne Flugzeuge. Man kann das Ergebnis so zusammenfassen: Wenn große Reichweiten möglich sein sollen, so muss auf kürzeren Strecken dafür ein etwas höherer Verbrauch in Kauf genommen werden.

Bild am Ende des Artikels:
Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Airbus A321 LR, XLR und A330-9, dichte Kabinenbestuhlung. Minimaler Verbrauch für die im Folgenden zu untersuchenden DOC-Missionen (Fonseca 2021).

Mission	M1 - 5600 km			M2 - 6500 km			M3 - 7400 km		
Aircraft (Configuration)	A321LR (200)	A321XLR (200)	A330-9neo (380)	A321LR (200)	A321XLR (200)	A330-9neo (380)	A321LR (186)*	A321XLR (200)	A330-9neo (380)
DOC [M US$/year]	35,27	36,20	73,91	35,44	36,61	74,43	35,12	36,54	74,84
CCAPITAL [M US$/year]	8,37	8,45	21,23	8,37	8,45	21,23	8,37	8,45	21,23
CHANDLING [M US$/year]	1,69	1,69	3,32	1,51	1,51	2,96	1,25	1,35	2,67
CLANDING [M US$/year]	0,84	0,88	2,18	0,75	0,78	1,94	0,67	0,70	1,75
CATC [M US$/year]	4,75	4,85	7,78	4,93	5,03	8,04	5,02	5,12	8,24
CCREW [M US$/year]	3,29	3,29	4,76	3,29	3,29	4,76	3,29	3,29	4,76
CMAINT [M US$/year]	2,25	2,27	4,27	2,21	2,22	4,12	2,17	2,18	4,00
CFUEL [M US$/year]	14,08	14,77	30,36	14,39	15,32	31,38	14,35	15,44	32,19
Aircraft trip costs [US$/flight]	49.473	50.776	100.009	55.644	57.468	113.109	61.614	64.107	126.210
Aircraft milecosts [US$/nm]	16,36	16,79	33,07	15,85	16,37	32,23	15,42	16,04	31,59
Aircraft kilometer costs [US$/km]	8,83	9,07	17,86	8,56	8,84	17,40	8,33	8,66	17,06
Seat-mile costs [US$/nm]	0,082	0,084	0,087	0,079	0,082	0,085	0,083	0,080	0,083
Seat kilometer costs [US$/km]	0,044	0,045	0,047	0,043	0,044	0,046	0,045	0,043	0,045
Costs per flight hour [US$/h]	7.496	7.693	15.874	7.322	7.562	15.494	7.082	7.369	15.206
Costs per block hour [US$/h]	5.869	6.023	12.301	5.901	6.094	12.389	5.851	6.088	12.459

Direct Operating Costs (DOC) berechnet mit der TU Berlin Methode, Standard-Kabinenlayout, ohne Zusatzfracht (Fonseca 2021). © Fonseca

Die Betriebskosten pro Flug sind bei der A330-900 natürlich höher. Das liegt einfach daran, dass das Flugzeug größer ist. Solange das Flugzeug vollbesetzt ist, sind die errechneten Sitzkilometerkosten (seat-mile-costs) wichtig. Hier ergeben sich fast durchgehend gleiche Werte, sowohl über die Flugzeuge als auch über die verschieden langen Flugstrecken. Die absoluten Ergebnisse der Methode sind nicht grob falsch, aber aufgrund der vielen Erfahrungsfaktoren in der DOC-Methode nur mit Vorsicht anzuwenden.



Aussagen von Airbus zur A321 XLR (https://perma.cc/JGR6-X64C) im Vergleich zu einem modernen Widebody (also beispielsweise A330 Neo) und einem vergleichbaren kleineren Flugzeugs mit Langstreckenmöglichkeiten (also beispielsweise Boeing 757). © Airbus

Die Aussagen von Airbus zum Thema sind eher trivial. Natürlich hat ein großes Flugzeug höhere Kosten. Die Prozentangabe (45 Prozent) kann die DOC-Tabelle bestätigen. Der Vergleich im Kraftstoffverbrauch mit einer Boeing 757 mit der einfachen oben vorgestellten Gleichung bestätig auch die 30 Prozent.

Die Umweltwirkung

Bild am Ende des Artikels:
Das "Ecolabel for Aircraft" angewandt auf den Airbus A321 LR in der Standardbestuhlung (all economy) des Flugzeugherstellers (Fonseca 2021).

Um die Umweltwirkung eines Passagierflugzeuges zu bewerten wurde ein "Ecolabel for Aircraft" entwickelt (http://ecolabel.ProfScholz.de). Das Label ist dem Energielabel der EU nachempfunden und ist unter anderem von Kühlschränken bekannt.

Die Bewertung in A bis G und das "Overall Rating" werden im Vergleich mit aktuellen Passagierflugzeugen und Triebwerken aus einer großen Datenbasis ermittelt. Der Airbus A321 LR schneidet als Flugzeug mit modernen Triebwerken gut ab.

Fazit

Beim Anblick des komfortablen Kabinenlayouts mit wenigen Passagieren wie bei Jetblue kam bei einigen Beobachtern die Idee auf, dass A321 LR und A321 XLR die kommunizierten Reichweiten womöglich nur aufgrund verringerter Nutzlast schaffen. Das ist nicht der Fall.

Wegen der Zusatztanks in Verbindung mit der Erhöhung der Abflugmasse werden große Reichweiten auch mit voller Kabine erreicht. Die meisten Airlines nutzen eine übliche enge Bestuhlung.



Die "Mint-Suite" von Jetbue für Transatlantikflüge im Airbus A321 Neo LR. © Jetblue

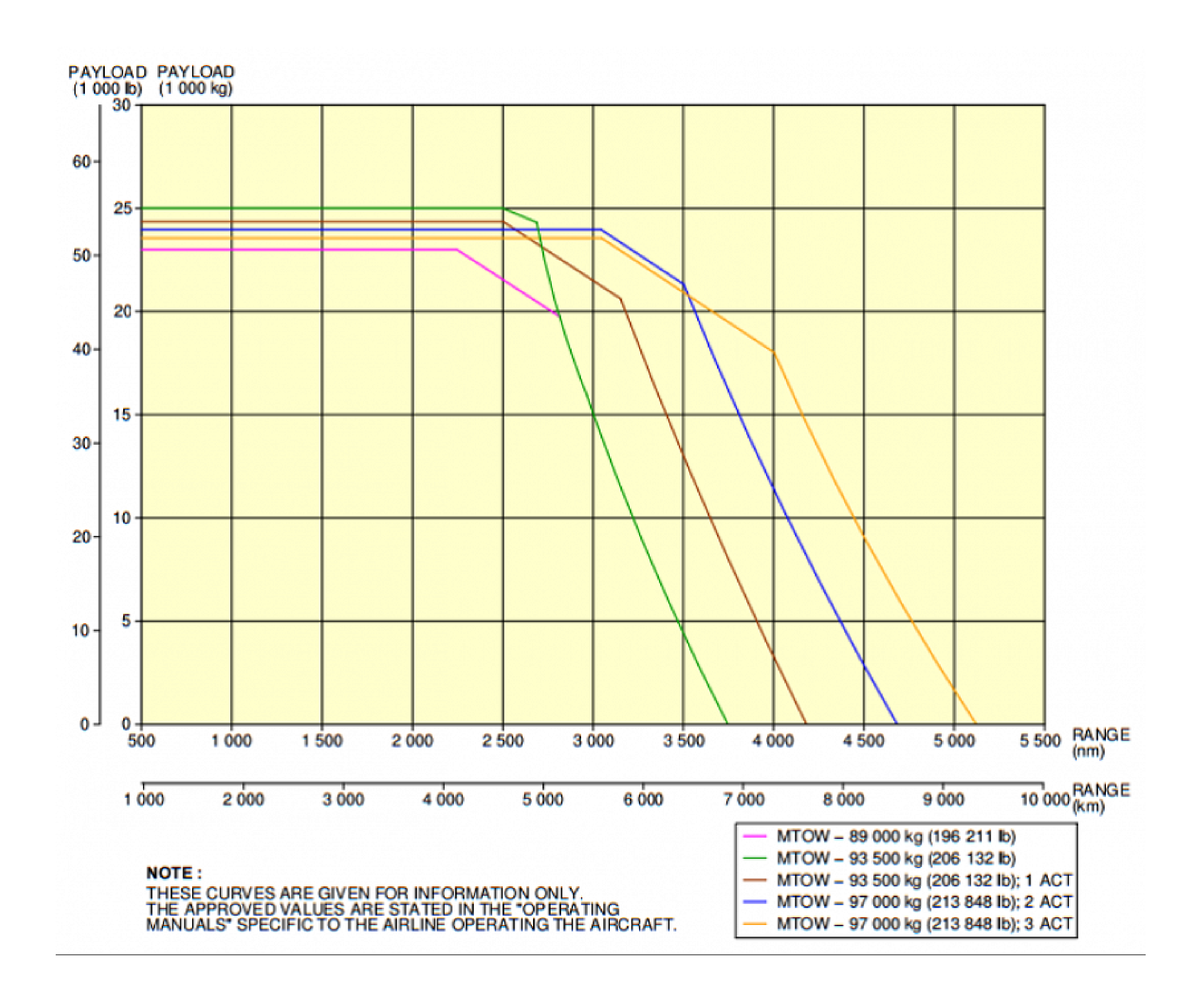
Ein Kostenvorteil durch Größe (Economy of Scale) fällt aber bei kleineren Langstreckenflugzeugen wie dem Airbus A321 LR und XLR weg. Wenn eine zweiköpfige Cockpitbesatzung mehr Passagiere gleichzeitig befördern, dann ist das ein Vorteil. Ebenso ist der spezifische Verbrauch von großen Strahltriebwerken geringer als der von kleinen Strahltriebwerken.

Aber nicht bei allen Kostenelementen kann so eingespart werden. Auf der Einnahmenseite ist positiv, dass Direktverbindungen tendenziell höhere Erlöse einbringen als Umsteigeverbindungen. Für Airlinekunden, die die großen Reichweiten nicht benötigen, bleibt die Standardvariante die beste Wahl.

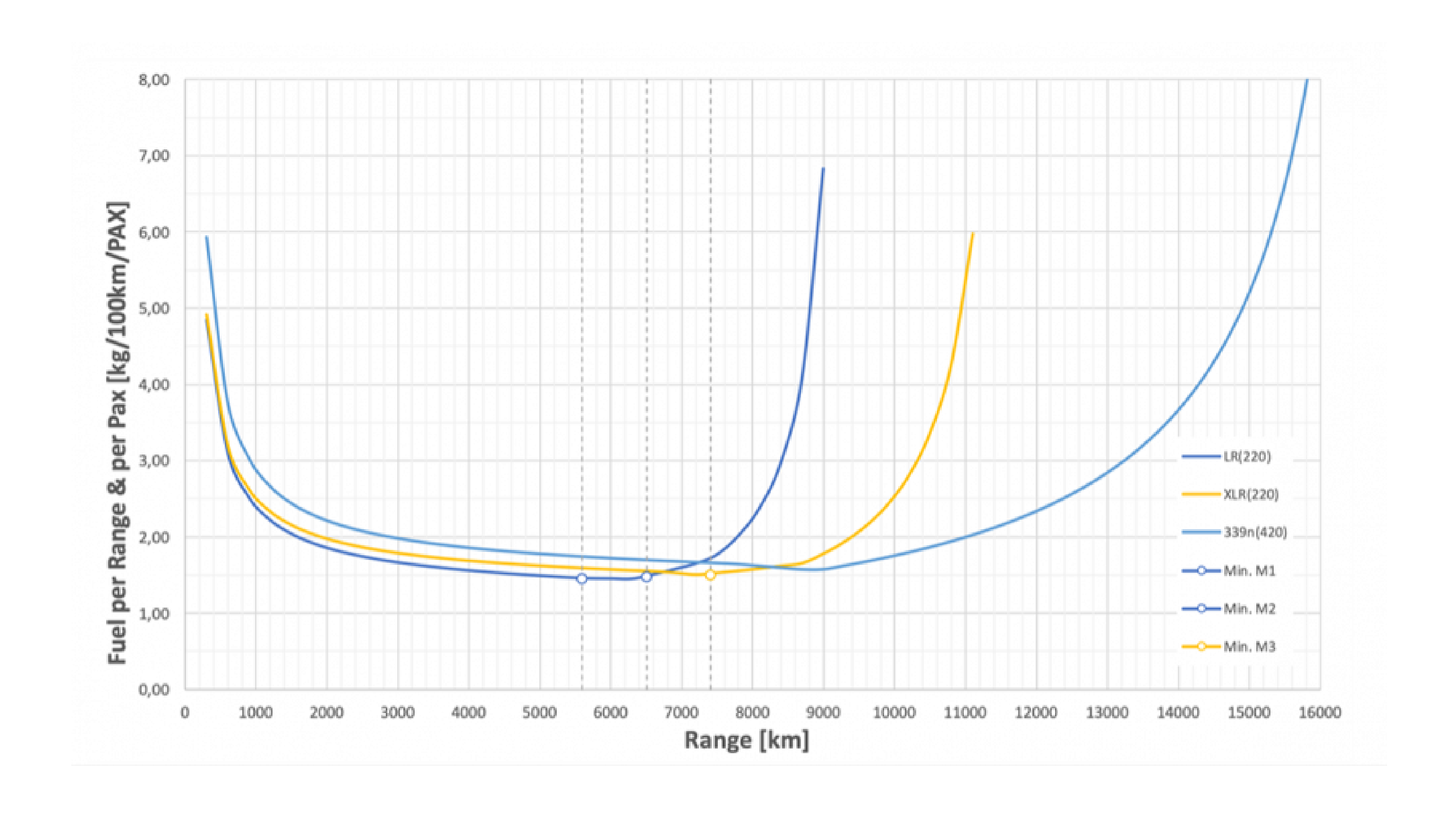
Von "Zero Emission" oder "Net Zero" sind LR und XLR noch weit entfernt, aber im Vergleich mit anderen Flugzeugen steht eine A321 Neo mit Blick auf das "Ecolabel for Aircraft" auch als LR oder XLR nicht schlecht da.

Quelle und Leseempfehlung:

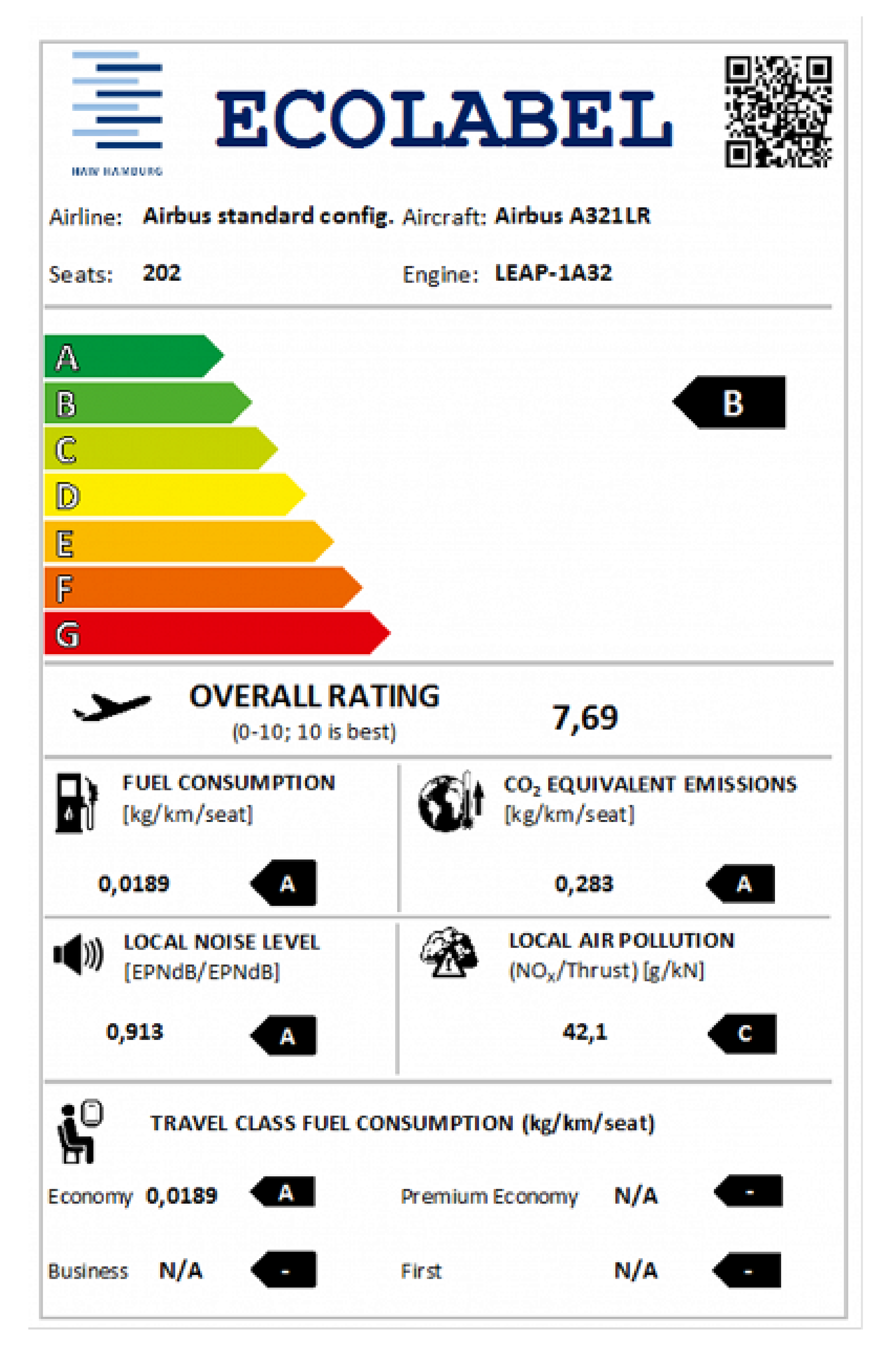
Fonseca, Diego, 2021. Direct Operating Costs, Fuel Consumption, and Layout of the Airbus A321LR. Bachelor Thesis. Hamburg University of Applied Sciences, Aircraft Design and Systems Group (AERO). Available from:
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2021-12-06.014



Das Nutzlast-Reichweitendiagramm für die verschiedenen Versionen der A321 Neo. © Airbus



Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Airbus A321 LR, XLR und A330-9, dichte Kabinenbestuhlung. Minimaler Verbrauch für die im Folgenden zu untersuchenden DOC-Missionen (Fonseca 2021). © Fonseca



Das "Ecolabel for Aircraft" angewandt auf den Airbus A321 LR in der Standardbestuhlung (all economy) des Flugzeugherstellers (Fonseca 2021). © Fonseca